

INFLUENCIA DEL CURADO SOBRE LAS PROPIEDADES DE TRANSPORTE DE HORMIGONES SOMETIDOS A RECICLADOS SUCESIVOS

Zega, C.J.¹ y Taus, V.L.²

RESUMEN

El uso de agregados provenientes de la trituración de hormigones de desecho está tomando una importancia creciente a nivel mundial, motivado principalmente por razones ambientales y económicas. Sin embargo, la falta de conocimiento sobre el desempeño durable de los hormigones reciclados hace que este avance sustentable no progrese rápidamente. La durabilidad depende fundamentalmente de la razón a/c del hormigón reciclado, del curado y del tipo de transporte por el cual los agentes agresivos pueden penetrar en el hormigón. En este trabajo se evalúa, a través de ensayos representativos de los distintos mecanismos de transporte de agua, la estructura porosa de hormigones que fueron reciclados en forma sucesiva analizándose la influencia que el curado tiene sobre dichos parámetros.

INTRODUCCIÓN

En la década del '70 aproximadamente 50 millones de toneladas de desechos de construcción eran demolidas cada año en las Comunidades Europeas y en Estados Unidos (1). La mayor parte de estos desechos eran depositados en sitios aptos para tal fin y pocas cantidades eran reutilizadas solamente para la estabilización de bases y sub-bases de caminos, debido al escaso conocimiento que se tenía sobre sus características.

Poco a poco se comenzó a estudiar el material que resulta de la trituración de estructuras de hormigón demolidas, con miras a utilizarlo como agregado en la producción de nuevos hormigones, observándose que presenta un aspecto visual y una composición diferente a la del agregado natural debido a que aparece mortero del hormigón original adherido a las partículas del agregado. Esto hace que sus propiedades físicas se vean modificadas en relación a las de un agregado natural (2-5).

Desde hace más de dos décadas, se han realizado distintos estudios con el fin de conocer el comportamiento de los hormigones reciclados desde el punto de vista resistente, comprobándose que el mismo puede ser semejante y en algún caso superior al de un hormigón convencional.

¹ Becario CIC-LEMIT

claudiozega@hotmail.com

Director: A.A. Di Maio (Investig. CONICET-LEMIT. Prof. Fac. Ing. UTN Reg. La Plata)

² Becario CIC-LEMIT

valetaus@hotmail.com

Directores: A.A. Di Maio – (Investig. CONICET-LEMIT. Prof. Fac. Ing. UTN Reg. La Plata)

L.P. Traversa – (Investig. CIC-LEMIT. Director del LEIMIT)

El mayor interrogante radica en su desempeño desde el punto de vista durable, debido a los elevados valores de porosidad que presentan los agregados reciclados en comparación con los agregados naturales, lo cual se traduce en una mayor capacidad de absorción del hormigón resultante (6).

Es conocido que la durabilidad del hormigón se la define como la capacidad para resistir el paso del tiempo sin degradarse, es decir, mantener su forma original, calidad y servicio durante la vida útil de la estructura de la cual forma parte (7). Los diversos mecanismos de deterioro del hormigón están asociados a su estructura porosa, la cual es función de la distribución del tamaño de poros y conectividad (8).

Algunas investigaciones realizadas sobre la capacidad de absorción de agua del hormigón reciclado, han concluido que para razones agua/cemento (a/c) elevadas, la influencia del empleo de agregados reciclados es despreciable y que comienza a tener importancia a medida que dicha razón a/c descende (2, 9, 10).

Por otro lado, en relación a la succión capilar se ha encontrado que para una dada razón a/c la velocidad de absorción capilar se incrementa con el porcentaje de agregado reciclado y con la reducción del curado (11). Otros trabajos han concluido que, si bien la succión capilar es algo mayor en los hormigones reciclados, la conducta mostrada por este fenómeno es opuesta al del mecanismo de absorción por inmersión, es decir, que si bien el empleo de agregados reciclados incrementa los valores de succión capilar del hormigón resultante, este incremento será menos significativo cuanto menor es la razón a/c (12, 13).

Con relación al efecto que el curado ejerce sobre este tipo de hormigón, algunos investigadores han encontrado que es mucho más notorio y benéfico que en los hormigones convencionales ya que en los hormigones reciclados cuando el tiempo de curado se acorta o bien se suprime, los valores de absorción y permeabilidad resultan muy superiores a los del hormigón convencional (14). Sin embargo, en otros estudios en los cuales se emplearon los agregados en condición saturada se observó que los hormigones eran menos sensibles al curado debido a que la mayor absorción de los agregados reciclados permite continuar la hidratación sin provisión de humedad exterior (15).

En virtud del escaso conocimiento que se tiene sobre el comportamiento durable del hormigón reciclado, se decidió evaluar la influencia del agregado reciclado y del tipo de curado efectuado sobre diferentes propiedades de los hormigones elaborados con dichos agregados. En este trabajo en particular, se presentan los resultados obtenidos en ensayos de absorción de agua (24 hs), succión capilar y penetración de agua a presión realizados sobre un hormigón convencional y sobre hormigones reciclados de manera sucesiva sometidos a dos tipos de curado, uno normalizado en cámara húmeda, y otro simulando un curado de obra, para lo cual algunas muestras, luego de 4 días de permanencia en dicha cámara, fueron retiradas y colocadas a la intemperie hasta la edad de ensayo (28 días).

EXPERIENCIAS

El presente estudio se encuadra dentro del plan de investigación que, desde hace varios años, se viene desarrollando en el LEMIT, evaluando diferentes características de los hormigones reciclados, tanto desde el punto de vista resistente como durable. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos sobre un hormigón convencional (HC) y sobre

los sucesivos hormigones reciclados (HR) elaborados a partir de la trituration de este último. Se evaluaron diferentes parámetros relacionados con la capacidad de transporte de agua a través de la estructura porosa del hormigón, por medio de distintos mecanismos como absorción de agua por inmersión, succión capilar y penetración de agua a presión.

Materiales y Mezclas

En la elaboración de cada uno de los hormigones se emplearon los mismos materiales y en idéntica proporción en volumen, variando solamente el tipo de agregado grueso empleado. Se utilizó un cemento portland compuesto (CPC-40) y mezcla de dos arenas silíceas naturales, una "Oriental" (MF: 2.67) y otra "Argentina" (MF: 1.66). En el caso del HC se empleó como agregado grueso una piedra partida granítica (ppg, $T_{máx}$: 25 mm), mientras que en los HR se reemplazó un 75% en volumen del agregado grueso natural por el agregado grueso reciclado (ar, $T_{máx}$: 25 mm) obtenido de la trituration del hormigón realizado en el ciclo anterior (16). La adopción de tal porcentaje surge como conclusión de diferentes trabajos efectuados con anterioridad (2, 17), en los cuales se determinó que dicho porcentaje de reemplazo resultó ser el límite para el cual los hormigones reciclados mostraron un comportamiento resistente semejante al del hormigón convencional de similares características.

En la Tabla 1 se presentan las propiedades físicas evaluadas en el agregado grueso natural y en los reciclados luego de cada proceso de elaboración de hormigones y trituration. Se indican la densidad en condición de saturada y superficie seca (Dss), absorción de agua en 24 hs (Ab) y pérdida por desgaste "Los Angeles" (DLA).

En todos los hormigones se empleó un contenido unitario de cemento de 310 kg/m^3 , una razón a/c = 0.50 resultando una consistencia plástica (asentamiento: $8 \pm 2 \text{ cm}$). Debe mencionarse que la obtención de un asentamiento prácticamente constante fue posible debido a que se trabajó con los agregados gruesos (naturales y reciclados) en estado saturado para evitar una mayor demanda de agua de mezclado, principalmente por parte del agregado reciclado motivada por su mayor capacidad de absorción.

Con cada una de las mezclas elaboradas, el hormigón convencional (HC) y los sucesivos hormigones reciclados (HR-01, HR-02, HR-03, HR-04 y HR-05), se moldearon probetas prismáticas y cúbicas para la realización de los diferentes ensayos. Las muestras fueron desmoldadas a las 24 hs y colocadas en cámara húmeda (temperatura: $20 \pm 2^\circ\text{C}$; humedad relativa: 95%). En cada uno de los hormigones se respetó el mismo procedimiento de curado: un grupo se mantuvo en cámara húmeda durante 28 días (28ch); mientras que otro grupo permaneció durante 4 días en dicha cámara y luego colocado a la intemperie hasta la edad de ensayo (4ch+24ext), simulando el curado normal de una estructura.

Tabla 1. Propiedades físicas de los agregados gruesos.

Propiedad	Agregado natural (ppg)	Agregados reciclados				
		ar-01	ar-02	ar-03	ar-04	ar-05
Dss (kg/dm ³)	2.62	2.46	2.41	2.37	2.34	2.35
Ab (%)	0.4	4.4	5.9	6.9	7.7	7.7
DLA (%)	28.0	36.4	45.5	47.8	46.9	49.2

Resultados y análisis

- Absorción y densidad

En la Tabla 2 se presentan los valores de absorción de agua en 24 hs (Ab) y densidad en estado seco (Ds) de cada uno de los hormigones elaborados y para los dos tipos de curado evaluados, determinados según Norma ASTM C 642-90.

Tabla 2. Densidad y absorción de agua de los hormigones en estudio.

Hormigones	Parámetros evaluados y tipo de curado			
	Ds (28ch)	Ab (28ch)	Ds (4ch+24ext)	Ab (4ch+24ext)
HC	2.29	5.1	2.30	4.9
HR-01	2.20	6.6	2.22	5.9
HR-02	2.15	7.0	2.17	6.7
HR-03	2.15	7.2	2.16	7.3
HR-04	2.14	7.4	2.14	7.6
HR-05	2.16	7.3	-	-

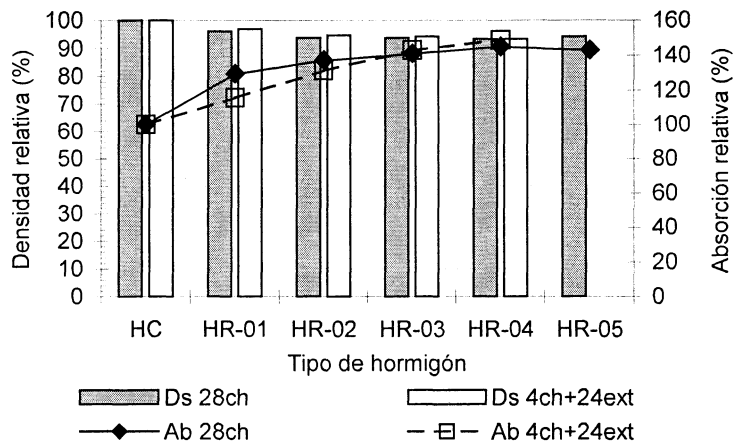


Figura 1. Densidad y absorción relativa de los hormigones HR para los dos curados evaluados.

En la Fig. 1 se presentan, para ambos curados, los valores de absorción y densidad de los diferentes hormigones HR relativos a los correspondientes del hormigón HC.

Puede observarse claramente que la densidad de los hormigones HR disminuye con cada ciclo de reciclado, llegando a ser hasta un 6.5% inferior a la del hormigón HC, independientemente del tipo de curado realizado. Respecto a la absorción de agua, se observa un incremento importante de la misma para el primer ciclo (28ch) manteniéndose

luego aproximadamente constante a partir del segundo ciclo (HR-02), mientras que para el otro curado (4ch+24ext) se torna constante a partir del tercer ciclo de reciclado. Para ambos tipos de curado, la absorción del hormigón HR puede llegar a ser hasta un 45% mayor que la del hormigón de referencia.

La disminución de densidad e incremento de la absorción de agua de los HR respecto al HC debe ser atribuido a la presencia de mortero adherido a las partículas del agregado reciclado (2). Por otra parte, puede observarse que los valores finales de densidad y absorción de los HR se aproximan a los de un mortero, hecho que debe ser atribuido a que se trabajó con un porcentaje de reemplazo relativamente alto de agregado natural por reciclado. Esto lleva a que la cantidad total de mortero presente en los agregados reciclados se incremente en los sucesivos ciclos, por lo tanto, el hormigón resultante sufre una reducción en el contenido de piedra natural y un incremento en el contenido de mortero, el del hormigón propiamente dicho más el del agregado reciclado.

- Succión capilar

Por medio de este ensayo se obtiene una caracterización de la estructura porosa del hormigón, en particular se evalúa la incidencia que ejerce la red de poros capilares (tamaño, distribución e interconectividad) sobre la absorción de agua por succión capilar.

La técnica de ensayo consiste esencialmente en registrar la ganancia de masa, a intervalos de tiempo prefijados, de una muestra de hormigón (75x75x50 mm) sometida a la acción del contacto con agua por una de sus caras, siguiendo la metodología descrita en la Norma IRAM 1871.

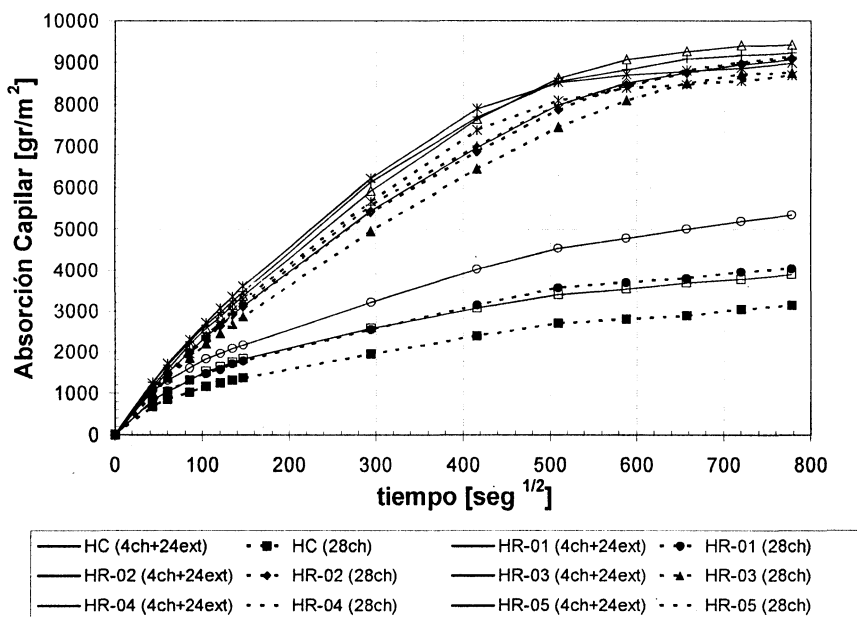


Figura 2. Absorciones capilares de HC y HR.

En la Fig. 2 se presentan las curvas de absorción en función del tiempo y en la Tabla 3 las velocidades (V_s) y capacidades (C_s) de succión capilar. El parámetro C_s corresponde al valor de la absorción por unidad de área para el cual se obtuvo una variación en la absorción inferior al 0.1% entre dos determinaciones sucesivas; V_s fue calculado como la pendiente de los puntos experimentales obtenida al graficar el incremento de masa por unidad de área en función del tiempo transcurrido, considerando la nube de puntos comprendida entre 0.1 y 0.9 de C_s .

En dicha figura se observa claramente que los hormigones que fueron curados durante un período de sólo 4 días en cámara húmeda, presentaron las mayores absorciones respecto a los curados durante 28 días en ambiente húmedo. En el primer caso las condiciones de curado se alejan de las del curado ideal de laboratorio (28 días a $T: 20\pm 2^\circ\text{C}$ y $HR: 95\%$), como consecuencia de ello, el hormigón resultó con una mayor porosidad capilar debido al déficit de agua necesario para alcanzar un nivel óptimo de hidratación.

En el caso de los hormigones curados en forma normalizada, la velocidad de succión del hormigón HR-01 resultó un 36% superior a la del HC, mientras que en el caso de los curados al aire fue del 26%. La gran absorción que presentan los agregados reciclados respecto a los agregados naturales permite la prolongación de la hidratación sin aporte de humedad exterior (15), ésta podría ser entonces la causa por la cual no se encontraron incrementos significativos de V_s en los hormigones curados en ambiente exterior (4ch+24ext).

Además, puede apreciarse que aumentos importantes de los parámetros V_s y C_s comienzan a manifestarse a partir del segundo nivel de reciclaje, adquiriendo la velocidad de succión capilar valores entre 2.5 a 3 veces la correspondiente a la del hormigón patrón para el curado exterior (4ch+24ext) y entre 3 y 3.5 veces para curado normalizado (28ch).

Tabla 3. Valores de V_s y C_s de los diferentes hormigones es estudio.

Hormigones	Velocidad ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{seg}^{1/2})$)	Capacidad (g/m^2)
HC (4ch+24ext)	5.75	3552
HC (28ch)	4.36	2808
HR-01 (4ch+24ext)	7.27	5190
HR-01 (28ch)	5.94	3708
HR-02 (4ch+24ext)	14.71	9072
HR-02 (28ch)	14.54	9091
HR-03 (4ch+24ext)	17.22	9394
HR-03 (28ch)	13.73	8747
HR-04 (4ch+24ext)	17.74	8796
HR-04 (28ch)	14.03	8473
HR-05 (4ch+24ext)	17.27	9170
HR-05 (28ch)	14.79	9122

Puede suponerse entonces que, considerando a la succión capilar como una propiedad representativa de la durabilidad, las mezclas evaluadas pueden lograr un adecuado comportamiento durable hasta un primer nivel de reciclaje, ya que a partir del segundo y en sus sucesivos reciclados, la estructura se torna lo suficientemente porosa como para producir incrementos importantes de los parámetros evaluados.

- Penetración de agua a presión

El ensayo consiste básicamente en someter a una muestra de hormigón en contacto con agua a presión variable sobre una de sus caras, preferentemente la de moldeo, durante un período de tiempo determinado. En la Fig. 3 se observa el equipo empleado para la realización de este ensayo, cuyo procedimiento se encuentra detallado en la Norma IRAM 1554.

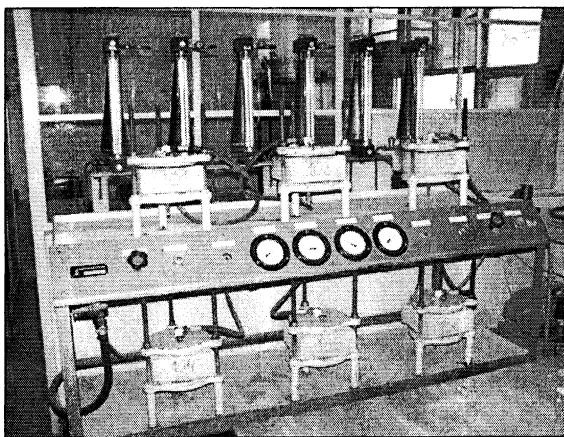


Figura 3. Equipo de penetración de agua a presión.

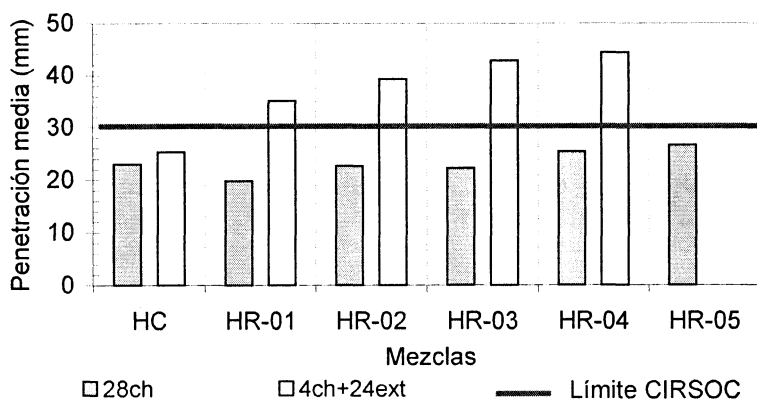


Figura 4. Penetración media de agua a presión en los diferentes hormigones en estudio.

En la Fig. 4 se presentan los valores de penetración media de agua a presión determinados a la edad de 28 días sobre cada uno de los hormigones en estudio y para los dos curados evaluados, como así también el límite establecido en el reglamento CIRSOC 201-2002.

Se puede distinguir un comportamiento totalmente diferenciado de los hormigones con curado normalizado respecto a los que sólo permanecieron en cámara húmeda durante 4 días. Puede observarse en el segundo caso (4ch+24ext) que con el avance de los ciclos de reciclado se produce un aumento en los valores medios de penetración de agua. En el primer caso (28ch), en cambio, a pesar de que el agregado reciclado empleado es el mismo que en el caso anterior, dichos valores se mantienen prácticamente constantes en todos los HR y son del mismo orden que en el HC. Se verifica además que para este último curado todos los hormigones cumplen con el límite impuesto por la reglamentación vigente, aún empleando un agregado reciclado que había estado sometido 5 veces a trituración. Los valores hallados se asemejan a los obtenidos en experiencias realizadas anteriormente sobre hormigones convencionales y reciclados, ambos de similares características (18).

En las Figs. 5 y 6 pueden observarse los perfiles de penetración obtenidos en muestras de hormigón reciclado (HR-03), para los dos curados evaluados. Se aprecia claramente que la muestra bajo curado normalizado (28ch) presenta un perfil de penetración del orden de la mitad del que presenta la muestra que sólo estuvo en cámara húmeda durante 4 días.

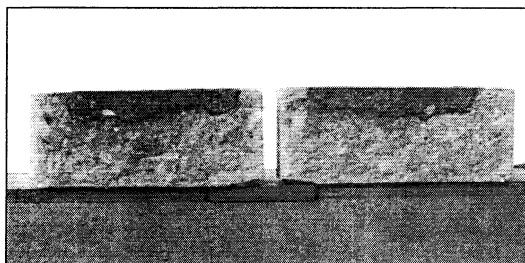


Figura 5. Hormigón HR-03 (28ch)

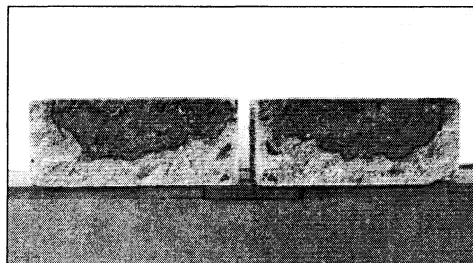


Figura 6. Hormigón HR-03 (4ch+24ext)

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio sobre un hormigón convencional y sobre hormigones reciclados en forma sucesiva, indican un comportamiento totalmente diferenciado conforme el mecanismo de transporte evaluado. Cuando el mecanismo de transporte se produce por absorción de agua por inmersión o succión capilar, la calidad del agregado empleado evidencia una mayor influencia que el tipo de curado realizado, hecho que se torna significativo a partir de una cierta calidad del agregado en cuestión. Sin embargo, esta tendencia se invierte cuando el mecanismo de transporte es inducido por una elevada presión exterior, como en el caso del ensayo de penetración de agua a presión. A partir de los resultados de este ensayo se observa que la calidad del agregado no tiene una influencia relevante y que los hormigones elaborados con agregados reciclados (hasta 5 ciclos) y sujetos a condiciones adecuadas de curado mantienen valores de penetración de

agua dentro de los límites establecidos en el Reglamento CIRSOC 201-2002, que considera hormigones con agregados naturales de peso normal.

REFERENCIAS

- (1) Hansen, T. C., "Recycled aggregates and recycled aggregate concrete. Second state of the art. Report developments 1945-1985", RILEM Technical Committee 37-DRC, Materials and Structures, Vol. 19, N° 111, pp. 201-246.
- (2) Zega, C. J. y Di Maio, A. A., "Influencia de las características de los agregados reciclados en la elaboración de hormigones", Proc. XV Reunión Técnica AATH, Santa Fe, 2003. Ed. CD.
- (3) Zega, C. J., "Hormigones reciclados: evaluación mediante método vibracionales", Ciencia y Tecnología del Hormigón, N° 10, 2003, pp. 65-71.
- (4) Gómez, J. M., Agulló, L. y Vázquez, E., "Cualidades físicas y mecánicas de los agregados reciclados de concreto", Construcción y Tecnología, Vol. XIII, N° 157, Junio 2001, pp. 10-20.
- (5) Hansen, T. C. and Narud, H., "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate", Concrete International, January 1983, pp. 79-83.
- (6) Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Skoczylas, F., Wirquin, E., "Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete", Cement and Concrete Composites, N° 25, 2003, pp. 223-232.
- (7) Metha, P. K., Monteiro, P. J. M., "Concreto: estructura, propiedades y materiales", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C., México, 1998, 381 p.
- (8) Fernández Luco, L., "La durabilidad del hormigón: su relación con la estructura de poros y los mecanismos de transporte de fluidos", en Durabilidad del Hormigón Estructural, AATH, Cap. 1, pp. 1-45.
- (9) Rasheeduzzafar and Khan, A., "Recycled concrete - A source for new aggregate", Cement, Concrete and Aggregate, Vol. 6, N° 1, 1984, pp. 17-27.
- (10) Levy, S. M. and Helene, P., "Durability of recycled aggregate concrete: a safe way to sustainable development", Cement and Concrete Research, N°34, 2004, pp. 1975-1980.
- (11) Olorunsogo, F. T. and Padayachee, N. "Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes", Cement and Concrete Research, N° 32, 2002, pp. 179-185.
- (12) Taus, V. L., "Determinación de la absorción capilar en hormigones elaborados con agregados naturales y reciclados", Ciencia y Tecnología del Hormigón, N° 10, 2003, pp. 7-16.
- (13) Taus, V. L., Di Maio, A. A. and Traversa, L. P. "Sorptivity: Parameter for the evaluation of cover concrete quality", Proceedings Fourth International Conference ACI, Brasil, 2005, ACI SP-229-8, pp. 121-134.

- (14) Buyle-Bodin, F. and Hadjieva-Zaharieva, R., "Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete", *Materials and Structures*, Vol. 35, N° 252, September-October 2002, pp. 504-509.
- (15) Villagrán Z., Y. A., Taus, V. L., Zega, C. J., Di Maio, A. A. y Traversa, L. P., "Propiedades de transporte en hormigones convencionales y reciclados, y su influencia en la corrosión de armaduras", Simposio *fib* "El Hormigón Estructural y el Transcurso del Tiempo", La Plata, Argentina, 2005. (en prensa)
- (16) Zega, C. J., Taus, V. L., Villagrán Z., Y. A. y Di Maio, A. A., "Comportamiento físico-mecánico de hormigones sometidos a reciclados sucesivos", Simposio *fib* "El Hormigón Estructural y el Transcurso del Tiempo", La Plata, Argentina, 2005. (en prensa)
- (17) Di Maio, A., Giacco, G. y Zerbino, R., "Hormigones con agregados reciclados", *Ciencia y Tecnología del Hormigón* N° 9, 2002, pp. 5-10.
- (18) Di Maio, A. A., Zega, C. J., Taus, V. L. and Traversa, L. P., "Durability of recycled concretes", National Conference In Situ Behaviour of Constructions, Bucharest, Romania, 2004, pp. 31-37.